

Analisis Bentuk *Crown* dan *Coating Piston Dome* Terhadap Daya & Torsi pada *Engine KYZ* Sepeda Motor

Limbar Ganiyun Hafizd^{1*}, Ramdhani², Yusep Sukrawan³

^{1*,2,3}*Prodi Pendidikan Teknik Otomotif, Universitas Pendidikan Indonesia*

*Email: limbarganiyun050902@upi.edu

Abstract

One of the focuses of automotive technology development is the improvement of small-capacity motorcycle engine performance, particularly the optimization of combustion chamber components without changing their geometric dimensions. One of the approaches is to modify the surface shape of the piston and apply a thermal protective coating on its surface. This research aims to determine the effect of applying variations of dome pistons and modifying dome pistons with ceramic coating on the dome pistons in terms of torque and maximum power in the KYZ motorcycle engine. The modification involves using variations of dome pistons and applying ceramic coating to the pistons without changing the bore size (*bore up*) or piston stroke (*stroke up*). The research method is experimental, involving mathematical calculations of the convex piston variations and testing the modifications of ceramic coating application on the convex piston (*dome piston*) based on test data using a dynamometer to determine its maximum torque and power. The sample of this research is a type of variable piston that has a convex surface shape. The results of the power and maximum torque tests using the dynamometer test equipment are presented in the form of a graph. The testing was conducted using the Dynojet50L dynamometer test tool over two testing periods, where the first test used a convex piston without ceramic coating, achieving a maximum torque of 4.21 N.m and a maximum power of 6.17 kW. Subsequently, the second test was conducted using a ceramic-coated convex piston, achieving a maximum torque of 5.29 N.m and a maximum power of 7.12 kW. Based on the research conducted, it was found that the application of ceramic coating on the piston part influenced the increase in maximum torque by 1.08 N.m and maximum power by 0.95 kW.

Keywords: Ceramic coating piston, dome piston, torque, power, internal combustion engine

Abstrak

Salah satu fokus pengembangan teknologi otomotif salah satunya adalah peningkatan performa *engine* sepeda motor berkapasitas kecil, khususnya optimalisasi komponen ruang bakar tanpa mengubah dimensi geometriknya. Salah satu pendekatannya yakni memodifikasi bentuk permukaan *piston* dan mengaplikasikan lapisan pelindung termal pada permukaannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengaplikasian variasi *piston* cembung dan modifikasi *piston* cembung yang diberikan *ceramic coating* pada *piston* cembungnya terhadap torsi dan daya maksimum pada *engine KYZ* sepeda motor. Modifikasi penggunaan variasi *piston* cembung dan pengaplikasian *ceramic coating* pada *piston* ini tanpa melakukan perubahan ukuran dimensi *bore (bore up)* atau langkah *piston (stroke up)*. Metode penelitian ini adalah eksperimen dengan melakukan perhitungan matematis variasi *piston* cembung serta pengujian terhadap modifikasi pengaplikasian *ceramic coating* pada *piston* cembung (*dome piston*) berdasarkan data hasil pengujian menggunakan alat tes *dynamometer* untuk mengetahui torsi dan daya maksimumnya. Sampel penelitian ini adalah salah satu jenis *piston* variasi yang memiliki bentuk permukaan cembung. Hasil data pengujian daya dan torsi maksimum menggunakan alat tes *dynamometer* disajikan dalam bentuk grafik. Pengujian dilakukan menggunakan alat tes *dynamometer* Dynojet50L sebanyak dua periode waktu pengujian dimana pengujian pertama menggunakan *piston* cembung tanpa *ceramic coating* memperoleh torsi maksimum 4,21 N.m dan daya maksimum 6,17 kW. Selanjutnya, pengujian kedua dilakukan dengan menggunakan *piston* cembung *ceramic coating* dengan torsi maksimum 5,29 N.m dan daya maksimum 7,12 kW. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diperoleh hasil bahwa pengaplikasian *ceramic coating* pada bagian *piston* memberikan pengaruh terhadap peningkatan torsi maksimum sebesar 1,08 N.m dan daya maksimum sebesar 0,95 kW.

Kata kunci: *Ceramic coating piston*, *piston* cembung, torsi, daya, motor pembakaran dalam

1. Pendahuluan

Sepeda motor merupakan salah satu transportasi pada masyarakat di Indonesia oleh karena kemampuan dalam mendukung mobilitas yang fleksibel dan efisien, serta biaya kepemilikan yang relatif terjangkau. Salah satu faktor yang mendukung diminatinya kendaraan sepeda motor untuk dimiliki adalah harga unitnya yang terjangkau dan hemat bahan bakar sehingga menjadi alasan untuk digunakan oleh masyarakat dalam kebutuhan berpergian ke suatu tempat [1]. Data Badan Pusat Statistik (BPS) memperoleh data peningkatan jumlah sepeda motor nasional sebesar 132,4 juta unit pada tahun 2024 [2]. Data peningkatan jumlah sepeda motor yang tinggi tersebut menunjukkan ketergantungan masyarakat pada peran sepeda motor sebagai sarana mobilitas, sekaligus mengimplikasikan meningkatnya kebutuhan pengembangan performa *engine* tanpa mengganti unit kendaraannya secara keseluruhan [3].

Kebutuhan peningkatan performa *engine* pada sepeda motor ditunjukkan oleh penerapan motor pembakaran dalam (*internal combustion engine*) sebagai sumber tenaga kendaraannya. Motor pembakaran dalam (*internal combustion engine*) merupakan mesin kalor yang mengubah energi kimia menjadi energi mekanis melalui proses pembakaran secara langsung pada fluida kerjanya yang mencampurkan bahan bakar dengan udara melalui upaya meningkatkan temperatur dan tekanan untuk menghasilkan gas agar memberi kerja pada *piston* [4].

Salah satu komponen utama pada *engine* yang berperan langsung pada proses konversi energi pada proses pembakaran tersebut adalah *piston*. *Piston* menjadi komponen suku cadang pada sepeda motor modifikasi salah satu komponen suku cadang sepeda motor yang sering dimodifikasi [5]. Modifikasi komponen *piston* mempengaruhi peningkatan performa disebabkan oleh beberapa faktor yang diantaranya karena bentuk permukaan *piston crown* dan sifat permukaannya yang secara langsung dapat mempengaruhi proses pembakaran, perpindahan panas, dan parameter performanya [6]. Berdasarkan penelitian eksperimental sebelumnya terkait hasil yang diperoleh menunjukkan adanya

pengaruh terhadap peningkatan performa *engine* dalam mengaplikasikan variasi bentuk permukaan *piston* cembung dibandingkan *piston* standar [7]. Modifikasi pada komponen *piston* dapat dilakukan dengan cara mengaplikasikan beberapa variasi bentuk permukaan *piston*-nya yang secara umum terdapat beberapa macam seperti *piston* datar (*flat piston*), *piston* cembung (*dome piston*), dan *piston* cekung (*bowl piston*) [5].

Proses pembakaran yang menciptakan adanya panas dan gesekan mekanis pada komponen *piston* menjadi permasalahan berupa keterbatasan performa yang sering muncul untuk motor bakar dengan kapasitas kecil terutama pada kendaraan sepeda motor roda dua. Keterbatasan performa pada motor pembakaran dalam tersebut disebabkan oleh adanya kehilangan panas (*heat losses*) dan gesekan internal antar komponen *engine* yang menyebabkan kerugian mekanis bahkan secara signifikan menurunkan efisiensi termal sehingga berpengaruh juga pada performa *engine*-nya secara keseluruhan [8].

Pendekatan yang dapat meningkatkan performa pada konteks mengurangi hilangnya panas dari hasil pembakaran adalah dengan memperoleh tekanan puncak pada silinder dan torsi yang dihasilkan oleh karena perubahan geometri pada permukaan *piston* melalui adanya modifikasi pola aliran *in-cylinder*, distribusi temperatur, dan proses laju pelepasan panas (*heat release*) [9]. Pendekatan lainnya untuk mengatasi masalah keterbatasan performa dan memperoleh peningkatan performanya adalah dengan memodifikasi geometri permukaan *piston* serta menerapkan teknologi *insulating coating* pelindung pada permukaan *piston* [10].

Penelitian eksperimental sebelumnya yang menerapkan *ceramic coating piston* menunjukkan kemampuan lapisan *ceramic coating* dalam memberikan efek terhadap operasional kerja didalam sistem motor pembakaran dalam untuk meningkatkan performa, meningkatkan ketahanan komponen, dan mereduksi kondisi yang bersifat korosif & abrasif sehingga mampu meningkatkan efisiensi daya yang dihasilkan [11]. Berdasarkan studi eksperimental pada perubahan geometri bagian *surface coating*

piston menjadi strategi untuk mengurangi perpindahan panas yang menghilang keluar dari komponen *piston*, sehingga mampu meningkatkan efisiensi termalnya agar memperbaiki ketahanan aus [12]. Pengaplikasian *coating* yang tepat berdasarkan hasil penelitian laboratorium pada berbagai konfigurasi *engine* memperoleh hasil terkait peningkatan efisiensi termal, penurunan konsumsi bahan bakar, dan perbaikan indikator keausan [13].

Penelitian sebelumnya telah bereksperimen sebagian besar pada jenis *engine diesel* atau *engine* dengan kapasitas besar dengan mengkombinasikan perubahan dimensi silindernya, sehingga keterbatasan diperoleh terkait penerapannya pada motor pembakaran dalam berjenis bensin terutama kapasitas kecil (kendaraan sepeda motor roda dua) [14]. Pendekatan tersebut dikecualikan oleh karena karakteristik termodinamika dan mekanika jenis *engine diesel* atau *engine* berkapasitas besar tidak merepresentasikan kondisi untuk *engine* dengan kapasitas kecil yang umumnya digunakan pada kendaraan sepeda motor.

Berdasarkan celah pada penelitian sebelumnya tersebut, penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental yang mengkaji evaluasi modifikasi bentuk permukaan *piston* cembung sebelum dan sesudah menerapkan *ceramic coating* terhadap performa *engine* tanpa mengubah dimensi geometrik silinder *engine KYZ* sepeda motor Honda Supra Fit 100cc. Unit sepeda motor Honda Supra Fit dipilih karena menjadi salah satu sepeda motor yang digemari oleh semua kalangan untuk dijadikan sebagai bahan modifikasi karena suku cadang yang mudah dicari dan proses penggantian sulit seperti salah satunya dikalangan *hardware* konversi [15]. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada pengujian eksperimental secara terpadu antara bentuk *piston* cembung dan penerapan *ceramic coating* pada *engine* berkapasitas kecil dalam kondisi geometrik standar yang termasuk ke dalam keterbatasan studi eksperimental sebelumnya.

Fokus penelitian ini bertujuan pada analisa pengaruh modifikasi *piston* cembung dan penerapan *ceramic coating* terhadap daya

& torsi yang dihasilkan *engine KYZ* sepeda motor Honda Supra Fit 100cc berdasarkan hasil pengukuran melalui mesin *dynamometer* BRT Super Dyno 50L. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan *piston* dan teknologi penerapan lapisan permukaan pada *engine* sepeda motor dengan kapasitas kecil, serta menjadi dasar teknis dalam upaya peningkatan performa *engine* tanpa memodifikasi dimensi geometrik.

2. Metode Penelitian

2.1. Jenis Penelitian

Pendekatan yang digunakan pada penelitian ini adalah eksperimen. Pendekatan penelitian eksperimen dipilih karena memungkinkan peneliti untuk memanipulasi dan mengontrol secara langsung terhadap variabel bebas secara terukur dan terulang.[16] Eksperimen tersebut menunjukkan penelitian ini yang menganalisis efek yang dihasilkan dari pengaplikasian *coating* terhadap daya dan torsi menggunakan pengukuran mesin *dynamometer*.

2.2. Modifikasi *Ceramic Coating Piston Cembung (Dome Piston)*

Coating merupakan penambahan lapisan menggunakan material tertentu untuk mencapai karakteristik permukaan *piston* menjadi berubah sesuai dengan bahan material *coating* yang digunakan untuk menghadapi gerak gesek *piston* dalam kerjanya agar mampu meningkatkan resistansi keausan, getaran, keausan silinder, dan mempertahankan sifat pelumas dengan baik [5].

Salah satu pengaplikasian *coating* yang mampu mencapai kemampuan karakteristik permukaan dengan nilai resistansi karat pada suatu objek adalah *ceramic coating* [4]. Pengaplikasian lapisan keramik (*ceramic coating*) untuk *piston* cembung pada penelitian ini dilakukan dibagian permukaan (*crown*) dan *skirt*. Lapisan keramik dilakukan menggunakan metode *thermal spray coating* berupa teknik pelapisan material keramik dalam kondisi semi-molten yang disemprotkan pada permukaan substrat logam dengan sifat isolasi termal dan ketahanan aus tinggi karena terbentuknya lapisan pelindung.

Thermal spray merupakan metode yang dipilih karena memiliki kemampuan untuk menghasilkan ikatan mekanis pada permukaan *piston* dengan baik dan telah menjadi metode umum digunakan pada pengaplikasian *thermal barrier coating*, khususnya komponen motor pembakaran dalam [17].

Proses pelapisan dilakukan dengan membersihkan terlebih dahulu permukaan *piston*, untuk kemudian diampas secara halus sebagai langkah persiapan permukaan. Permukaan yang telah diampas halus dibersihkan menggunakan pelarut untuk menghilangkan kontaminan minyak dan oksida. Tujuan daripada beberapa langkah pada tahapan pelapisan tersebut dimaksudkan untuk membentuk lapisan dengan kontrol ketebalan dan adhesi yang baik antara material *coating*-nya dengan substrat logam, sehingga pengaplikasiannya cocok untuk motor pembakaran dalam seperti komponen *piston* yang bekerja secara berulang pada siklus termalnya dengan temperatur tinggi [18].

Profil pengaplikasian lapisan pada permukaan *piston* yang dimodifikasi penelitian ini adalah *ceramic coating* dengan ketebalan profil permukaan Ra 350-500 mikro-inci. Pemilihan nilai profil permukaan tersebut ditentukan oleh karena pertimbangan diperolehnya keseimbangan antara kemampuan adhesi lapisan, ketahanan aus, dan karakteristik interaksi permukaan *piston* selama *engine* bekerja. Tingkat ketebalan lapisan pelindung yang terkontrol dapat meningkatkan stabilitas sekaligus mempertahankan lapisan *film* pelumas pada kontak *piston* dengan silinder, sehingga berkontribusi terhadap reduksi kehilangan energi akibat gesekan [13].

Penerapan *ceramic coating* pada komponen *piston* cembung tersebut dengan demikian dalam penelitian ini tidak hanya bertujuan meningkatkan ketahanan permukaan, akan tetapi optimalisasi karakteristik termal dan interaksi antar komponen terutama *piston* pada *engine* KYZ sepeda motor Supra Fit 100cc.

2.3. Alat dan Bahan Penelitian



Gambar 1. Piston Modifikasi Cembung (*Dome*)

Gambar 1 merupakan *piston* cembung sebelum diaplikasikan *ceramic coating* pada bagian *crown* dan *skirt piston*.



Gambar 2. Piston Modifikasi Cembung *Ceramic Coating*

Gambar 2 adalah *piston* cembung (*dome piston*) yang sudah dilakukan modifikasi *ceramic coating* pada bagian *crown* dan *skirt piston*.



Gambar 3. Rangkaian Instrumen *Dyno Test* BRT Super *Dyno* 50L

Keterangan:

- A. *Dyno Hardware* & Sepeda Motor Honda Supra Fit 100cc.
- B. *Dyno Software*.
- C. *CPU Box*.
- D. *AFR Box*.
- E. *AFR Pick Up*.
- F. *Remote*.
- G. *Bosch O2 Sensor* & *Databox*.
- H. *Adapter Sensor*.

Gambar 3 merupakan rangkaian alat tes *dyno* BRT Super Dyno 50L yang masing-masing komponennya berfungsi sebagai penunjang untuk melakukan pengujian agar dapat memperoleh nilai daya dan torsi maksimum yang dibutuhkan.

2.4 Teknik Pengumpulan Data

Perolehan data pada pengujian ini didapatkan dengan cara menguji objek yang diteliti, kemudian mencatat keperluan data berdasarkan tampilan hasil yang ditunjukkan pada alat tes *dyno* BRT Super Dyno 50L terkait daya dan torsi maksimum-nya.

Pengujian pertama mengaplikasikan *piston* permukaan cembung pada *engine* KYZ sepeda motor Honda Supra Fit 100cc. Pengujian dengan pengaplikasian ini belum dilakukan modifikasi penambahan *coating* untuk diketahui daya dan torsi maksimum yang dihasilkan dari mesin *dyno* BRT Super Dyno 50L. Pengujian kedua dilakukan dengan pengumpulan data yang sama seperti pengujian pertama namun dengan mengaplikasikan *piston* modifikasi yang telah diberikan *coating* pada bagian *crow*n dan *skirt piston*.

Pengujian dilakukan dengan metode “gas instan”, yakni dengan menghidupkan engine kendaraan, menempatkan posisi transmisi pada gigi empat, kemudian memutar tuas gas secara mendadak sampai dengan mencapai putaran maksimum (RPM *Max*) dengan maksud memperoleh daya dan torsi puncaknya. Pendekatan pengujian dengan metode tersebut menunjukkan prosedur akselerasi mendadak yang secara efektif mampu memeriksa respon torsi dan daya terhadap variasi bentuk *piston* (torak) [19].

3. Hasil Penelitian

3.1. Perbandingan *Piston* Standar dan *Piston* Cembung sebelum *Ceramic Coating*

Tabel 1. Perbandingan piston standar dan piston cembung

Parameter	<i>Piston</i> Standar	<i>Piston</i> Cembung
Volume Langkah	97,14 cm ³	97,14 cm ³
Rasio Kompresi	8,8	9,4

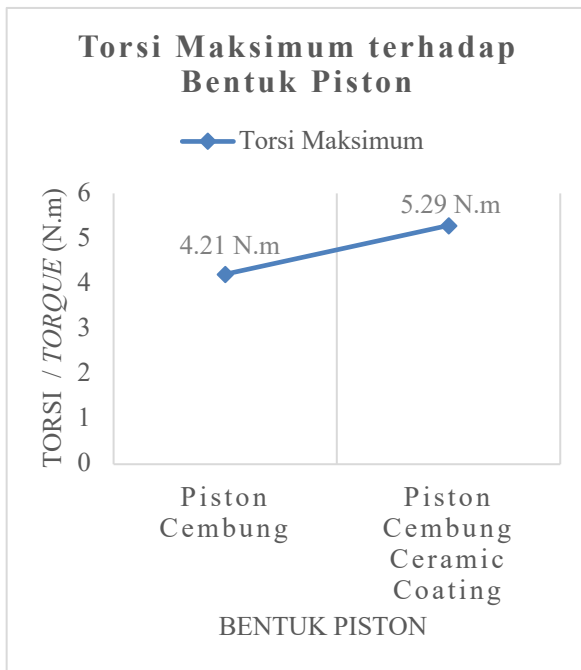
Volume Ruang Bakar	12,45 cm ³	11,5 cm ³
Volume Total Silinder	109,6 cm ³	108,6 cm ³
Gaya yang Bekerja pada <i>Piston</i>	303,03 N	305,79 N
Tekanan Ruang Bakar	154410,19 N/m ²	155817,78 N/m ²
Torsi	7.5 N.m	7.5 N.m
Daya Motor	5,9 kW	6 kW

Hasil perbandingan antara *piston* standar dengan permukaan datar dengan *piston* cembung sebelum diaplikasikan *ceramic coating* terhadap setiap parameternya seperti yang disajikan pada tabel 1 diatas. *Piston* cembung sebelum diaplikasikan *ceramic coating* berbanding dengan *piston* standar memperoleh nilai lebih besar pada parameter rasio kompresi, gaya yang bekerja pada *piston*, tekanan ruang bakar, dan daya. Sementara itu, parameter volume ruang bakar dan volume total silinder sebaliknya yakni lebih besar *piston* standar. Parameter lainnya yaitu volume langkah dan torsi untuk kedua jenis *piston* cenderung memiliki nilai yang sama. Perbedaan hasil tersebut disebabkan karena bentuk permukaan *piston* cembung yang cenderung memperkecil volume didalam ruang bakar sehingga memperkecil volume dan meningkatkan tekanan.

3.2. Perbandingan *Piston* Cembung Sebelum dan Sesudah *Ceramic Coating*

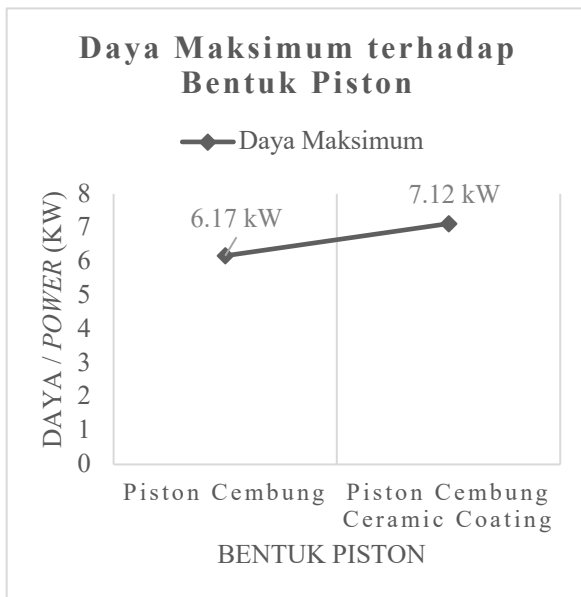
Pengujian menggunakan alat *dynotest* ini dilakukan secara berulang untuk memperoleh torsi dan daya maksimum berdasarkan penggunaan *piston* cembung sebelum dengan sesudah pengaplikasian *ceramic coating* pada *engine* KYZ sepeda motor Supra Fit 100cc disajikan menggunakan grafik.

Hasil pengujian menggunakan alat *dynotest* dengan melihat *output* torsi dan daya maksimumnya diperoleh bahwa terdapat perbedaan berupa peningkatan setelah diaplikasikannya *ceramic coating* pada penggunaan *piston* cembung seperti yang disajikan pada grafik gambar 4 dan 5 dibawah ini.



Gambar 4. Perbandingan Torsi Maksimum Piston Cembung sebelum dan sesudah Ceramic Coating

Torsi maksimum sebelum diaplikasikan *ceramic coating* pada *piston* cembung diperoleh pada waktu (s) ke-6,39 dengan putaran *engine* (RPM) 10.200. sementara itu, setelah diaplikasikannya *ceramic coating* pada *piston* cembung mengalami peningkatan nilai torsi maksimalnya yaitu pada waktu (s) ke-4,5 pada putaran *engine* (RPM) 7.600.



Gambar 5. Perbandingan Daya Maksimum Piston Cembung sebelum dan sesudah Ceramic Coating

Daya maksimum yang diperoleh menunjukkan bahwa pada *piston* cembung sebelum diaplikasikan *ceramic coating* diraih pada durasi waktu (s) ke-10,5 dengan putaran

engine (RPM) 14.500. Kemudian, setelah diaplikasikannya *ceramic coating* pada *piston* cembung yang mengalami peningkatan perolehan daya maksimum didapat pada waktu (s) ke-11,41 dengan putaran *engine* (RPM) 15.550.

Berdasarkan hasil perbandingan daya maksimum antara *piston* cembung sebelum dengan sesudah diaplikasikan *ceramic coating*, diperoleh peningkatan nilai torsi dengan selisih mencapai 1,08 N.m. Sementara itu, peningkatan pun ditunjukkan oleh nilai daya yang selisihnya mencapai 0,95 kW. Temuan penelitian ini yang menunjukkan peningkatan nilai torsi dan daya maksimum setelah penerapan *ceramic coating* konsisten seperti studi eksperimental terdahulu pada penggunaan *piston coated ceramic* yang menyatakan peningkatan performanya secara fenomena terjadi karena adanya peningkatan efisiensi termal dan pengurangan kerugian panas selama proses pembakaran didalam ruang bakar [20].

Peningkatan ini dipengaruhi karena faktor karakteristik yang muncul dari lapisan *ceramic coating* pada bagian *crown* dan *skirt* dalam kemampuan untuk menjadi sebuah media resistansi gesekan berupa getaran [21]. sementara itu, dilihat dari sudut pandang secara kimiawinya menunjukkan bahwa struktur mikro lapisan keramik (*ceramic coating*) berbasis $Al_2O_3-TiO_2$ mampu memperbaiki ketahanan aus dan mengurangi gesekan piston dengan dinding silindernya [22].

4. Kesimpulan

Variasi bentuk *crown piston* dalam penggunaannya adalah membandingkan antara *piston* standar yang memiliki bentuk datar dengan *piston* cembung berdasarkan perhitungan matematis tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap daya dan torsi yang dihasilkan. Namun, modifikasi *piston* berupa penambahan lapisan *ceramic coating* pada bagian *crown* dan *skirt* memberikan pengaruh terhadap daya dan torsi dalam pengujian menggunakan mesin *dynotest*. Peningkatan performa tersebut disebabkan karena adanya material *ceramic* yang terdiri dari beberapa campuran kimiawi agar mampu memberikan karakter resistansi gesekan,

getaran, dan konsentrasi konduktivitas panas hasil dari proses pembakaran yang terjadi selama *engine* bekerja.

5. Saran

Diperlukan adanya penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh dalam jangka yang panjang terkait pengaplikasian *ceramic coating* terhadap temperatur dan *mechanical stress* akibat adanya peningkatan performa pada torsi dan daya pada *engine*.

6. Daftar Pustaka

- [1] A. Surahman, A. T. Prastowo, and L. A. Aziz, "Rancang Alat Keamanan Sepeda Motor Honda Beat Berbasis Sim Gsm Menggunakan Metode Rancang Bangun," *J. Teknol. Dan Sist. Tertanam*, vol. 3, no. 1, Feb. 2022.
- [2] "REFERENSI BPS statistik-transportasi-darat-2023."
- [3] B. Chiu and E. Guerra, "What predicts motorcycle ownership, mode choice, and use for utilitarian travel? A literature review," *Transp. Rev.*, vol. 43, no. 6, pp. 1165–1189, Nov. 2023.
- [4] K. Wróbel, J. Wróbel, W. Tokarz, J. Lach, K. Podsadni, and A. Czerwiński, "Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Review," *Energies*, vol. 15, no. 23, p. 8937, Nov. 2022.
- [5] A. P. Lutfianto, "Analisis Pengaruh High Dome Piston Terhadap Tekanan Efektif Rata-Rata Dan Efisiensi Thermal Mesin Sepeda Motor Honda Supra X 125 Pgm-Fi" *J. Tek. Mesin Unesa*, vol. 11, no. 01, pp. 103–110, 2023.
- [6] X. Dai and Z. Zheng, "Effects of Piston Shape on the Performance of a Gasoline Direct Injection Engine," *ACS Omega*, vol. 6, no. 50, pp. 34635–34649, Dec. 2021.
- [7] M. A. Naufal, S. Maulana, and R. F. Naryanto, "Pengaruh Variasi Bentuk Permukaan Piston Dan Bahan Bakar Terhadap Performa Sepeda Motor," *Automot. Sci. Educ. J.*, vol. 14, no. 02, pp. 26–33, 2025.
- [8] Z. Wang, S. Shuai, Z. Li, and W. Yu, "A Review of Energy Loss Reduction Technologies for Internal Combustion Engines to Improve Brake Thermal Efficiency," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6656, Oct. 2021.
- [9] H. E. Gulcan and M. Ciniviz, "Corrigendum to 'Experimental study on the effect of piston bowl geometry on the combustion performance and pollutant emissions of methane-diesel common rail dual-fuel engine' [Fuel 345 (2023) 128175]," *Fuel*, vol. 364, p. 130969, May 2024.
- [10] R. Y. Dahham, H. Wei, and J. Pan, "Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges," *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 6222, Aug. 2022.
- [11] R. A. Weber and R. Zatorski, "Ceramic Coated Piston Rods for Civil Works," Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, Apr. 1999.
- [12] K. K. N. *et al.*, "Influence of ceramic thermal barrier coating on diesel engine performance using scum oil biodiesel at different compression ratios," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 31094, Aug. 2025.
- [13] P. Balu, P. Saravanan, and V. Jayaseelan, "Effect of ceramic coating on the performance, emission, and combustion characteristics of ethanol DI diesel engine," *Mater. Today Proc.*, vol. 39, pp. 1259–1264, 2021.
- [14] D. Weßling, H. Rottengruber, J. Achenbach, and T. Fischer, "Experimental investigation of thermal swing piston insulation at single cylinder gasoline engine," *Automot. Engine Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 95–107, Jun. 2023.
- [15] Joni, "Analisis Pengaruh Oversize Silinder Dengan Variasi Tingkat Kecepatan Terhadap Unjuk Kerja Sepeda Motor Supra Fit," *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 6, no. 1, pp. 91–97, Apr. 2022.
- [16] D. W. Rachmawati *et al.*, *Teori & Konsep Pedagogik*. Cirebon: Insania, 2021.
- [17] N. Ramasamy, M. Abul Kalam, M. Varman, and Y. H. Teoh, "Comparative Studies of Piston Crown Coating with YSZ and Al₂O₃-SiO₂ on Engine out Responses Using Conventional Diesel and Palm Oil Biodiesel," *Coatings*, vol. 11, no. 8, p. 885, Jul. 2021.
- [18] M. Bogdan and I. Peter, "A Comprehensive Understanding of Thermal Barrier Coatings (TBCs): Applications, Materials, Coating Design and Failure Mechanisms," *Metals*, vol. 14, no. 5, p. 575, May 2024.
- [19] O. A. Towoju and T. A. Adeyi, "Numerical Investigation of the Use of Some Piston Crown Geometry on CI Engine Performance," *Asian J. Adv. Res. Rep.*, pp. 22–27, Dec. 2021.
- [20] S. Mohamed Abbas, A. Elayaperumal, and G. Suresh, "A study on combustion and performance characteristics of ceramic coated (PSZ/Al₂O₃) and uncoated piston –

- D.I engine,” *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 1328–1333, 2021.
- [21] Mahle and Mahle, Eds., *Cylinder Components: Properties, Applications, Materials*. Stuttgart: MAHLE GmbH, 2010.
- [22] A. Vadivel, D and S. Periyasamy, “Experimental Investigation of Thermal Barrier (8YSZ-MGO-TiO₂) Coated Piston used in Diesel Engine,” *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 13, no. 4, pp. 1157–1165, Jul. 2020.